“饲料－畜禽－粪尿”链磷高效利用与减排研究

郭勇庆[1,2] 屠 焰[3] 柏兆海[1] 马 林[1*]

（1.中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心，中国科学院农业水资源重点实验室，河北省节水农业重点实验室，石家庄 050021；2.华南农业大学动物科学学院，广州 510642；3.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081）

摘 要：磷是动物必需的矿物元素之一，影响着畜禽的生长发育和生产性能。但是畜禽生产中磷利用效率通常较低，未被消化利用的磷会随粪尿排出，使得环境中磷不断富集，引起水体富营养化等环境污染。饲料生产、畜禽养殖、粪尿利用等环节均影响着磷的利用效率，因此本文综述了我国“饲料－畜禽－粪尿”链中磷的流动规律，探讨源头控制、过程控制和终端控制全链条磷减排机理和技术途径，并对今后畜禽生产中磷减排研究的主要方向和重点进行了展望。

关键词：磷；饲料；畜禽；粪尿；减排

中图分类号：S811 文献标志码：A 文章编号:

近年来，农业面源污染已成为我国农村生态与环境质量恶化的重要原因之一，阻碍着现代农业和社会的可持续发展，其中畜禽粪尿磷排放引起的环境污染逐渐引起人们的高度关注。当前，美国和欧盟等经济发达国家已采用了养分综合管理措施来减轻或消除粪尿磷的污染，并制订了相关法律法规，而我国尚缺乏相关研究和政策来进行粪尿磷的系统减排工作。磷是畜禽体内第二大矿物元素，是骨骼和牙齿的主要成分，同时在参与体内多种代谢和维持细胞膜稳定等方面具有重要功能[1]。畜禽生产中饲粮中磷的利用率通常较低，未被消化利用

收稿日期：2018-04-05

基金项目：河北省杰出青年科学基金（D2017503023）；云天化国际植物营养研究院开放项目（YTHZWYJY2016004）；中国科学院“百人计划”项目；河北省奶牛产业创新团队绿色发展与废弃物资源化利用岗位专家项目

作者简介：郭勇庆（1981-），男，河北邯郸人，讲师，博士，主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: yongqing@scau.edu.cn

*通信作者：马 林，研究员，博士生导师，E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

的磷随粪尿排出体外，易造成环境中磷的富集[2]。饲粮中未被消化的植酸磷和磷酸盐是畜禽粪尿中磷的主要来源[3]；农田中过量施用或丢弃畜禽粪尿时易导致磷在土壤中累积饱和，通过淋洗、径流等途径造成水体富营养化[4]，引起水体溶解氧浓度降低、透明度下降及水生生物死亡等生态问题[5]。因此，面对快速发展的畜禽养殖业，应及时采取措施来控制畜牧生产磷排放对环境的影响。

作为一种非再生资源，磷是继蛋白质之后第 2 种最昂贵的饲料组分，但是由于磷源饲料在饲粮中所占比例较小，人们对饲粮中磷的添加量与排出量缺乏精确的核算，在提高饲粮中磷的利用率、降低环境污染方面也未受到足够的重视，特别是养殖业和种植业缺乏数据联动，各学科之间相对独立，没有形成很好的养分管理链条。因此，笔者拟结合我国当前研究现状，从“饲料－畜禽－粪尿”链影响磷利用效率的关键环节出发，探讨全链条养分管理技术在磷管理中的应用和可行性，分析各关键技术在提高磷的利用效率和减少环境磷排放中的技术原理应用效果，并对今后畜禽生产磷减排技术研究方向进行展望，旨在为我国畜禽生产磷管理提供科学依据和技术支撑。

1 我国“饲料－畜禽－粪尿”链磷流动规律

我国畜牧生产系统中磷的利用效率较低，只有 5%的饲料磷转化为可食用部分，再加上骨骼等共计 22%转化为畜产品，36%的粪尿磷用作有机肥还田施用，其余 50%左右的磷随粪尿排出体外而未被有效利用，有造成环境污染的风险[6]。Bai 等[7]研究发现，2010 年我国畜禽摄入的磷总量为 545 万 t，只有 80 万 t 转化为了畜产品，460 万 t 磷则随着粪尿排出体外（图 1）；磷在畜舍、贮存、处理和施用等各个环节均有不同程度的损失，因此应从“饲料－畜禽－粪尿”全链条来开展磷的减排。许多因素影响磷在“饲料－畜禽－粪尿”链的流动，主要包括饲粮因素（磷含量、磷源、钙磷比）、动物因素（种类、品种、生长阶段）、管理因素（饲养环境、精细化程度、应激、疾病）以及粪尿的收集、贮存、利用等。

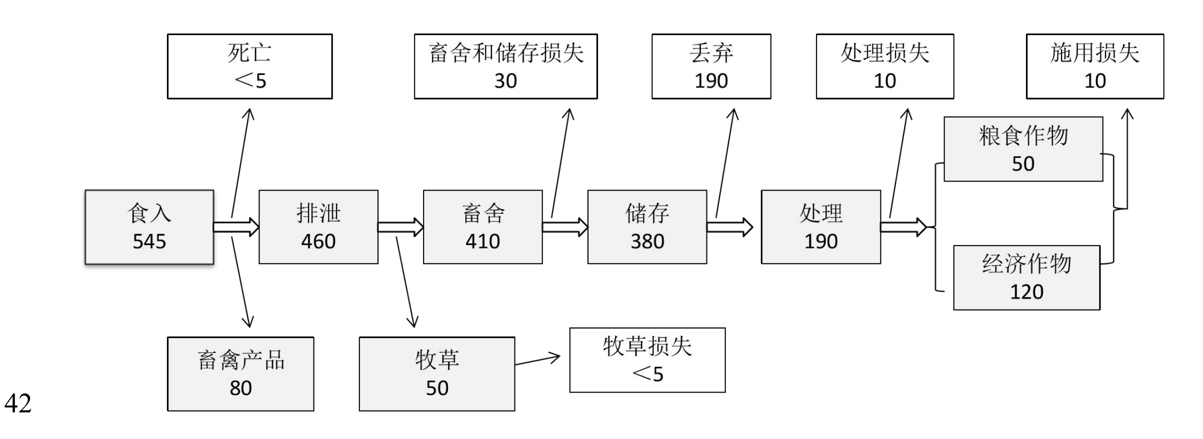


图 1 2010 年我国“饲料－畜禽－粪尿”磷流动特征（单位：万 t）

Fig.1 Phosphorus flow rule in feed-animal-manure chain in China in 2010[7]

根据畜禽生产中磷的流动规律，我们可以借鉴“食物链养分减排策略”来进行系统磷减排。该策略主要根据养分在食物链中的流动规律，将减排分为 3 个关键环节：1)两端源头控制，即降低作物生产环节含磷化肥的投入，控制饲粮中磷的投入和浪费；2)食物链各系统之间养分循环，减少不必要的养分损失现象；3)核心环节减排。通过采取两端源头控制、减少畜禽生产过程损失和关键环节减排等技术来进行系统磷减排，可以起到提高磷利用效率和降低磷排放的效果[8]。

2 源头控制——精准饲粮调控，减少饲粮磷投入

畜禽对饲料中磷的利用受多种因素影响，主要包括以下 3 个方面：1)饲粮磷水平。畜禽对磷的需要在某一生理状态和饲养环境中是保持基本稳定的，当饲粮中磷水平超过畜禽需要时，多余的磷会随粪尿排出体外。2)磷源的溶解度。磷源的溶解度对磷的吸收起决定性作用，在吸收细胞接触点可溶解的磷容易被吸收。3)饲粮钙含量和钙磷比。高钙低磷或高磷低钙均可抑制饲料中磷的吸收[9]，因此适宜是饲粮钙含量和钙磷比对于畜禽磷利用效率很重要[10]，但是，不同畜禽种类和生产阶段需要的钙磷比不一致，文中不再详细讨论。因此，本部分主要从降低饲粮磷水平和增加磷源的溶解度（包括使用高效磷酸盐和添加植酸酶）着手，以期从源头上管控磷的添加量和提高磷的利用率。

2.1 饲粮磷的精准饲喂

饲粮中磷含量超过畜禽的需要量是引起粪尿磷排出量增多的直接原因之一。因此，准确评估畜禽对磷的需要量是科学设计饲粮的基础，同时也是减少磷排放的主要措施。生产中，

企业配制饲料时通常留出磷的富裕量，以完全满足畜禽对磷的需要量。本研究组对华北地区饲料企业的调研发现 2016 年我国猪、肉鸡和蛋鸡饲料的企业标准的总磷设定值与我国饲养标准和美国饲养标准（NRC）的推荐值基本一致，但非植酸磷（NPP）设定值比美国饲养标准值高 15%~30%（肉鸡前期除外）。因此，配制饲料时应根据饲料原料组成、含磷量及畜禽磷需要量，适当降低企业标准中的 NPP 设定值[11]。但饲粮中磷含量又不宜过低，必须满足畜禽对有效磷的需要，否则不仅会影响畜禽的生产性能，还会影响磷的利用率，对减少磷的污染不利[12]。

在反刍动物上，Dou 等[13]对美国 600 多个奶牛场进行了调研，结果发现泌乳奶牛饲粮中磷含量的范围较宽，从 0.36%到 0.70%不等，平均为 0.44%，高于 NRC（2001）推荐量的 34%；当前，我国在配制奶牛饲粮时仍采用 2004 年修订的《奶牛饲养标准》，通过该标准计算得出的后备母牛、泌乳奶牛和干奶牛磷需要量分别比 NRC（2001）的推荐量高 31%、74%和 26%[14]。近年来，许多学者研究了泌乳奶牛[15-19]和生长母牛[20-21]饲粮磷的适宜需要量，通过泌乳性能、繁殖性能和骨骼生长等指标来进行综合评价，研究结果表明，饲粮磷含量为 0.30%~0.34%时能够满足后备母牛的最大日增重、骨骼强度和正常血磷浓度，饲粮磷含量在 0.32%~0.42％时即可满足整个泌乳期的需要，降低饲粮磷含量至 0.30%时对奶牛的繁殖性能、产奶量和乳成分均影响较小；同时得出，随着饲粮中磷含量的升高磷吸收率逐渐下降，饲喂高磷饲粮时粪磷的排泄量增加[22]。因此，应根据奶牛的饲养阶段和产奶量等来重新确定饲粮中磷的含量，以减少高磷饲粮引起的环境风险。

2.2 使用高利用率磷源

磷的存在形式和溶解性决定了磷被畜禽机体利用的程度。饲粮中的磷有 3 个来源：植物原料、动物源和矿物质磷酸盐。不同来源磷的生物学利用率存在很大差异，无机磷和动物来源磷的利用率通常高于植物来源磷。植物饲料里的磷有 50%～70%以植酸磷形式存在，其磷的消化率因植酸磷含量及植酸酶活性的不同而变化很大，如小麦、豌豆中磷的消化率分别为 47%和 45%，大麦、大豆中磷的消化率为 37%～39%，而玉米和玉米加工副产品中磷的消化率仅为 10%～20%[23]。随着植酸酶在饲料工业中大量推广和应用，植物原料中的植酸磷利用率较以前有了很大提高。骨粉等动物源性饲料由于其存在疫病风险，目前仅少量应用于家禽饲粮中。目前，饲粮中常用的几种磷酸盐有磷酸氢钙（DCP）、磷酸一二钙（MDCP）、磷

酸二氢钙（MCP）、脱氟磷酸钙（TCP）和磷酸二氢钾（MPP）等。磷酸盐在畜禽饲粮中必不可少，尤其是对于单胃动物。万荣等[24]比较了用植酸酶与 MCP 来满足肉鸡的可消化磷时，植酸酶组的体增重和胫骨灰分含量均显著低于 MCP 组，从而得出在配制饲粮时高估了植酸酶的作用，在肉鸡饲粮中应搭配使用磷酸盐来满足磷需要量。以前的研究认为畜禽对磷酸盐的利用率为 100%，然而 Van der Klis 等[25]研究表明，对于 3 周龄肉鸡来说饲料级磷酸盐的有效性为 55%~92%。屠焰等[26]也比较了不同磷酸盐在肉仔鸡饲粮中的磷利用率，4 种参试物磷的生物学利用率以饲料级 MCP 最高，其次是饲料级 DCP 和骨粉，TCP 最低。曹慧[27]研究了仔猪饲粮中不同磷酸盐磷的生物学利用率，结果发现：相对于 MPP（100%）来说，MCP、MDCP、DCP 和 TCP 的生物学利用率分别为 93%、87.3%、76%和 66%。采用生物学利用率高的磷源，一方面可以降低饲粮中磷酸盐总量的投入，另一方面通过粪尿排出体外的磷相应降低，可以减缓对环境的负面影响。因此，在选择磷酸盐时不能只考虑总磷含量，还应考虑其磷的生物学利用率。

2.3　使用植酸酶

植酸是植物来源磷的主要形式，充分利用植酸磷对于单胃动物非常重要。植物饲料原料中通常含有 0.5%~2.0%的植酸，典型的单胃动物和水产动物饲料中植酸含量约为 1.0%[28]。单胃动物胃肠道中植酸酶活性较低，植酸磷的利用率很低。研究表明，猪只能利用玉米中磷的 10%~20%，豆粕中磷的 25%~35%，其余部分随粪尿排出[29]。在饲粮中添加植酸酶能使植酸中的磷释放出来成为无机磷[30]。植酸酶在猪、鸡等单胃动物饲粮中的添加量一般为 300~500 U/kg，可以降低饲粮中 0.1%有效磷含量。研究表明，在肉鸡[31-32]、肉鸭[33]、蛋鸡[34]、猪[35]饲粮中添加植酸酶均能提高饲粮中植物来源磷的利用效率，降低磷排放，同时可以降低饲粮中 30%~75%的磷酸盐用量[29]。例如，生长猪玉米-豆粕型饲粮中总磷含量约为 0.6%，粪磷含量约为 2.0%，添加植酸酶后使粪磷含量降至 1%以下，磷的表观消化率从 40%~50%增至 60%~80%[36]。但是，添加植酸酶同时可能会增加粪中游离或可溶磷含量[37]，因此在饲粮中使用植酸酶时不是添加量越大越好，应根据基础饲粮中植酸磷的含量和畜禽需磷量来准确估测植酸酶的添加量，避免因植酸酶使用不当对环境造成潜在的负面影响[38]。

通过基因工程培育出能在植物体表达植酸酶的新品种也可提高植酸磷的利用率。张军民等[39]在研究中指出转植酸酶基因玉米可以替代外源植酸酶作为一种植酸酶来源在肉仔鸡饲

粮中使用，以起到减少磷酸盐的添加量和降低磷排放的目的。在低磷饲粮中使用转植酸酶基因玉米代替普通玉米，可以提高断奶仔猪的平均采食量、日增重以及钙、磷的表观消化率[40]。

3 过程控制——高效饲养管理，提高养殖磷效率

畜禽的生产性能、磷利用效率与饲养管理密切相关。通过优化饲养管理，能够提高肉、蛋、奶等畜禽产品的产量，最大限度地发挥优良品种的生产潜力，缩短其饲养周期，进一步提高养分利用效率，降低粪尿中磷、氮等养分的排泄量[41]。影响畜禽生产性能和饲料利用效率的饲养管理因素很多，包括畜禽品种、饲养环境、饲养方式、动物福利、疾病等。

3.1 选择饲料报酬高的品种

除饲养地方品种用于生产特色畜禽产品外，规模化生产中选择生长速度快、饲料报酬高的畜禽品种，可以缩短饲养周期，减少单位产品的废弃物排放量[42]。廖明星[43]研究发现：杜洛克、长白、大白猪的饲料转化效率分别为 2.15、2.11 和 2.09，表明达到相同体重时大白猪的磷摄入量和磷排出量最低。

3.2 采用分阶段饲养方式

畜禽的生长发育阶段不同，需磷量和饲养管理措施不同，因此采取精细化阶段饲养方式，能够提高生产性能和养分利用效率。段栋梁等[44]研究表明，生长育肥猪采用 4 阶段和 5 阶段饲养方式时的体重和饲料利用率均显著高于采用 3 阶段饲养方式时。Nahm[45]在其综述中指出，采用阶段化饲养方式能够减少 10%~13%的猪粪尿磷排泄量，同时指出选用易消化的饲料原料可以降低 5%猪和鸡的磷排泄量。

3.3 改善饲养环境和减少应激

采用适度饲养规模和饲养密度，改善饲养环境（温度、湿度、光照、通风等）和减少各种应激能够提高畜禽的免疫力、日增重和饲料转化效率。对于磷的吸收和利用，环境因素影响很大，比如光照时间不合理或光照不足时，会引起畜禽机体发生缺磷的症状；舍饲饲养方式的畜禽发生低钙和低磷症状的概率要比非舍饲及自由采食的的畜禽高很多[45]。

4 终端控制——循环畜禽粪尿，减少粪尿磷排放

未被畜禽利用的磷主要通过粪尿排出体外，因此对粪尿、污水等废弃物的收集、贮存和利用等环节加以管控，能够减少磷对环境造成的污染。研究表明，养殖场粪尿和污水中含磷

量都很高，如猪粪中含磷量为 1.72%~2.70%，牛粪中含磷量为 0.44%~0.53%，猪场废水中含磷量为 499.76 mg/L，牛场固液分离污水中含磷量为 261.99 mg/L[46]，如不合理贮存、处理和利用，则会对环境造成很大影响。

4.1 提高畜禽粪尿磷在"饲舍－贮存－处理"链的循环利用效率

合理收集、贮存和处理畜禽粪尿可减少磷的损失。采用干清粪法收集粪尿时耗水量较少，使粪尿初步固液分离，减少氮磷等养分流失，利于堆肥等后续处理；相反，采用冲水式清粪时耗水量大，产生的污水量高于干清粪法，磷流失和污水处理难度也相应增加[46-47]。此外，采用雨污分流措施，可实现粪尿与雨水、冲圈水等废水的分离，减少污水总量和粪尿中磷通过磷溶等途径对环境的影响。

当前，我国仍存在畜禽粪尿循环利用环节断裂和尿贮存设施不足的问题，雨水的冲淋作用使磷等养分易随地表径流进入水体或渗透进土壤中引起污染[48]。规模化畜禽养殖场的粪尿通常采用粪棚堆放的方式[49]，但是大部分粪棚容积小于实际需要，且条件简陋，只能短期存放；散养户和规模较小的养殖场由于饲养场面积和资金不足，通常是随意堆放畜禽粪便，大部分没有专门的粪尿储存设施。李国林[50]通过对规模化奶牛场的产污系数进行测算，得出了不同清粪方式和不同规模奶牛场田间贮污池的规格和参数，如果按照要求建立贮存池，可以满足奶牛场半年污水排放总量的存放，且不会产生因降雨造成的污水外溢现象，能够有效降低粪尿磷对环境的影响。因此，采用专业贮存设施（化粪池或田间贮存池）可以减少畜禽粪尿贮存阶段的磷排放，养殖场应根据其畜禽种类和养殖量，结合当地土地资源和种植制度，建立起粪尿循环利用制度和贮存设施。

堆肥和厌氧发酵是养殖场常用的粪尿肥料处理化技术。堆肥过程中会大量释放小分子有机酸，促进难溶磷溶解，使粪中的磷随着有机物腐解转变为植物较易吸收的形态，但是总磷含量变化较小[49]。厌氧发酵能降低粪尿的总磷量，付广青等[51]研究发现，猪粪和牛粪经厌氧发酵后沼渣中总磷量分别比进料总磷量降低了 4.05%和 8.04%；猪粪发酵后沼液中液相磷降低了 77.35%，固相磷降低了 29.95%；而牛粪发酵后液相磷降低了 79.47%，固相磷增加了 38.66%。对于畜禽液态粪尿来说，常见的去除磷元素的技术主要有吸附法、混凝法、沉淀法、生物法和离子交换法等[52]，但是，由于以上方法投入和运行成本较高，在实际生产中应用相对较少，而液态粪污中的磷更容易通过径流等途径造成环境污染，因此，应加强此方

面的研究和管控工作。

4.2 有机肥磷高效施用

将畜禽粪尿还田，可以充分利用其中的氮、磷、有机质等养分，因此是最经济的利用方式。畜禽粪尿经厌氧、好氧和堆肥化处理之后，可作为灌溉水或肥料回用到土地，该法可减轻粪尿乱排对农田生态系统和水体造成的危害，也有利于充分利用所含的氮、磷等养分来改良土壤结构，提高土壤肥力和农作物产量，具有粪污处理和农业利用的双重目的和意义。当前，我国的畜禽粪尿还田率较低，只有 36%[6]，而欧盟的畜禽粪尿还田率则为 100%[53]。因此，应逐步提高我国畜禽粪尿还田率，发展农牧结合或种养结合的养分资源化利用策略，以最大限度地利用粪尿资源，减少环境压力。但是，如果过量施用畜禽粪尿，超过耕地土壤承载力时，也易造成氮、磷养分流失和环境污染。因此，粪尿还田利用应根据其氮、磷养分含量和作物需要规律、土地承载力等来综合考虑。

5 “饲料－畜禽－粪尿”链磷的管理

5.1 “饲料－畜禽－粪尿”链磷管理的必要性

氮、磷等养分作为动物的生命元素和环境污染因子，不仅存在于畜禽生产体系，还与植物生产、资源利用、人类食物消费、生态环境密切相关，伴随着化肥、饲料、食物等物质不断沿着“资源－化肥－畜牧生产－家庭消费－环境”体系进行纵向流动[54]，其中各养分的存量和流量直接关系着资源、环境和生产效率。Bai 等[7]定量研究了粪尿中氮、磷、钾在“饲料－排泄－畜舍－粪尿储存－处理－施用”链中的流动规律，结果表明，在畜舍和粪尿贮存环节损失的磷占总损失量的 12.5%，而直接排放损失的磷则占到总损失量的 79.1%。

畜牧生产的磷管理涉及到饲料配方、饲养技术、饲舍管理、有机肥生产和施用等多个环节，因此需根据磷在“饲料－畜禽－粪尿”链的流动规律，采取综合措施来进行养分管理。Oenema 等[55]研究表明，采用养分综合管理技术和相关政策法规，可有效提高畜禽生产系统的养分利用效率，减少环境排放，同时提高 25%的经济效益。张福锁等[54]在研究中指出，我国畜牧生产体系的养分优化管理尚处于初步阶段，而欧美发达国家已开展了使饲料损耗最小化、提高饲料利用效率、分阶段饲养、拟合养分需求、添加植酸酶等大量探索，可以减少 5%~15%的磷排放量，且大部分措施已经在实践中推广和应用[56]。

5.2 “饲料－畜禽－粪尿”链磷管理的研究方向

从单一环节考虑养分的流动特征，很难对磷等养分在畜牧生产中的整个生命周期进行管理，因此，未来磷的管理和研究要扩展到整个食物链上，从多个关键环节入手，提高整个系统的磷利用效率。Ma 等[8,57]利用物质流方法建立了食物链养分流动模型（NUFER 模型），用来分析氮、磷等养分在“农田－畜牧－食品加工－家庭消费”链中的流动特征、利用效率和环境损失变化，为研究畜牧生产的养分流动提供了方法。柏兆海[2]在 NUFER 模型基础上建立了 NUFER-animal 模型，对猪、奶牛、肉鸡等不同生产系统的氮、磷利用效率和环境损失参数开展了研究。魏莎等[58]利用 NUFER 模型研究了北京城郊近 30 年猪生产体系的氮、磷利用效率和环境损失，结果显示采用精准饲喂、粪便优化管理和农牧结合等综合技术能够促进养分利用效率和生猪养殖可持续发展。

未来对于我国畜牧业磷减排的研究，首先应摸清当前不同种类和生长阶段畜禽饲粮中的磷含量、磷酸盐种类和添加量、植酸酶活性和添加量等影响饲粮磷利用效率的现状，同时根据磷在“饲料生产－畜禽养殖－粪尿管理”链中的流动规律，采取养分资源综合管理技术，着手于整个生产链中影响磷利用效率的关键控制点，定量化分析不同优化措施对磷利用效率和粪尿磷排放的影响，建立提高我国畜禽磷利用效率和降低粪尿磷排放的技术列单。

5.3 “饲料－畜禽－粪尿”链磷的管理措施

为了实施磷系统减排技术，我国应通过宣传教育、修订饲料磷需要量的国家或企业标准、采取粪尿污染管控奖惩制度、提高经济可行性等具体措施，来提高和约束饲料企业和养殖场对环境磷污染的认识和自觉性，以保证磷减排技术的顺利实施；畜牧、环保等部门应及时研究出台土地和资金补贴政策，支持种养结合技术，发展适度规模畜禽养殖场，加强粪尿资源化利用新机械和技术的研发与推广。同时，政府或大学推广服务部门应开展技术培训和援助，帮助养殖场实施畜禽磷减排技术，形成政府和大学主导社会共同参与的技术推广机制。

6 小　结

磷的利用效率与整个畜禽生产过程密切相关，在饲料、畜舍、粪尿贮存、处理和施用等多个环节均有磷的损失。因此，我国的畜禽生产系统中应采用饲粮磷精准饲喂、使用高水溶性磷酸盐、使用植酸酶等源头控制技术，选择饲料报酬高的畜禽品种、分阶段饲养等过程控制技术，以及优化粪尿磷管理等终端控制技术，从全链条角度开展系统磷减排，同时采取宣传推广、奖惩并举、资金补贴等多种措施保证磷减排技术的顺利实施，为提高我国磷资源利

用效率和降低粪尿磷排放提供技术支撑，也可为畜禽生产中氮、碳等其他养分管理提供思路，有利于促进我国畜牧业健康和可持续发展。

参考文献：

[1] 计成.动物营养学[M].北京:高等教育出版社,2008.

[2] 柏兆海.我国主要畜禽养殖体系资源需求、氮磷利用和损失研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2015.

[3] 曾悦, 洪华生, 曹文志, 等.九龙江流域养猪场氮磷流失特征研究[J].农业工程学报,2005,21(2):116–120.

[4] SHARPLEY A,TUNNEY H.Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st Century[J].Journal of Environmental Quality,2000,29(1):176–181.

[5] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等.水体富营养化的形成、危害和防治[J].环境科学与技术,1999(2):11–15.

[6] LI G H,ITTERSUM M K V,LEFFELAAR P A,et al.A multi-level analysis of China's phosphorus flows to identify options for improved management in agriculture[J].Agricultural Systems,2016,144:87–100.

[7] BAI Z H,MA L,JIN S Q,et al.Nitrogen,phosphorus,and potassium flows through the manure management chain in China[J].Environmental Science & Technology,2017,50(24):13409–13418.

[8] MA L,WANG F H,ZHANG W F,et al.Environmental assessment of management options for nutrient flows in the food chain in China[J].Environmental Science & Technology,2013,47(13):7260–7268.

[9] 王玮.降低肉仔鸡饲粮中无机磷添加量的初步研究[D].硕士学位论文.扬州:扬州大学,2014.

[10] 周俊成.降低钙磷比可增高磷的利用率[J].国外畜牧学(猪与禽),1998(5):20–22.

[11] 郭勇庆, 屠焰, 张乃锋, 等.中国饲料磷推荐水平及磷酸盐应用现状和优化分析[J].中国农业科学,2018,51(3):581–592.

[12] 罗士津, 瞿明仁, 张铁鹰.低磷日粮对猪生长性能、骨骼及血液指标的影响[J].中国畜牧

业,2015(20):77–79.
[13] DOU Z,FERGUSON J D,FIORINI J,et al.Phosphorus feeding levels and critical control points on dairy farms[J].Journal of Dairy Science,2003,86(11):3787–3795.
[14] 张晓明.NRC 2001 版《奶牛营养需要》中有关磷需要量内容的解读与思考[J].饲料研究,2006(12):48–51.
[15] WU Z,SATTER L D,BLOHOWIAK A J,et al.Milk production,estimated phosphorus excretion,and bone characteristics of dairy cows fed different amounts of phosphorus for two or three years[J].Journal of Dairy Science,2001,84(7):1738–1748.
[16] 刘振.日粮磷水平对奶牛生产性能及磷排放的影响[D].硕士学位论文.杭州:浙江大学,2010.
[17] 宋范成.日粮磷水平对奶牛瘤胃发酵,产奶性能及磷消化代谢的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
[18] 赵恒聚.日粮磷水平对泌乳中期奶牛生产性能及磷排放的影响[D].硕士学位论文.保定:河北农业大学,2010.
[19] WU Z,SATTER L D,SOJO R.Milk production,reproductive performance,and fecal excretion of phosphorus by dairy cows fed three amounts of phosphorus[J].Journal of Dairy Science,2000,83(5):1028–1041.
[20] BJELLAND D W,WEIGEL K A,HOFFMAN P C,et al.The effect of feeding dairy heifers diets with and without supplemental phosphorus on growth,reproductive efficiency,health,and lactation performance[J].Journal of Dairy Science,2011,94(12):6233–6242.
[21] ESSER N M,HOFFMAN P C,COBLENTZ W K,et al.The effect of dietary phosphorus on bone development in dairy heifers[J].Journal of Dairy Science,2009,92(4):1741–1749.
[22] 张晓明.奶牛养殖业对环境的污染及其控制[J].中国畜牧杂志,2011,47(8):38–42.
[23] 黄春红.植物饲料磷的利用及其影响因素研究[D].硕士学位论文.长沙:湖南农业大学,2004.
[24] 万荣, 谢木林.无机磷酸盐仍是动物磷源的重要选择[J].饲料广角,2014(8):16–17.
[25] VAN DER KLIS J D,VERSTEEGH H A J.Phosphorus nutrition of poultry[C]//GARNSWORTHY P C,WISEMAN J,HARESIGN W.Recent Advances in Animal Nutrition.Nottingham,UK:Nottingham University Press,1996.
[26] 屠焰, 范先国, 霍启光.不同含磷矿物质饲料中磷相对生物学利用率的研究[J].动物营养

学报,2000,12(1):32–37.

[27] 曹慧.猪对饲料级磷酸盐磷生物学利用率的研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2003.

[28] SELLE P H,WALKER A R,BRYDEN W L.Total and phytate-phosphorus contents and phytase activity of Australian-sourced feed ingredients for pigs and poultry[J].Australian Journal of Experimental Agriculture,2003,43(5):475–479.

[29] 张惠, 洪翊棻, 李洪波.环保饲料的配方技术及应用研究[J].中国猪业,2015,10(11):21–23.

[30] SIMONS P P C M,VERSTEEGH H A J,JONGBLOED A W,et al.Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs[J].British Journal of Nutrition,1990,64(2):525–540.

[31] 孟婕.饲粮中不同植酸酶添加水平对肉仔鸡的生长性能及养分利用的影响[D].硕士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2006.

[32] 李跃.植酸酶在不同植酸磷水平肉鸡饲粮中的应用效果研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2006.

[33] 唐岭田, 黄志勇, 杨在宾, 等.植酸酶对蛋鸭磷生物学利用率的研究[J].山东农业大学学报（自然科学版）,2009,40(3):334–340.

[34] 张楠楠.不同植酸酶对常用饲料原料植酸磷的降解效果及在蛋鸡生产中的应用研究[D].硕士学位论文.保定:河北农业大学,2015.

[35] 王志恒, 杨维仁, 郭宝林, 等.不同无机磷水平日粮添加植酸酶对保育猪生长性能、血清生化指标及养分表观消化率的影响[J].畜牧兽医学报,2015,46(10):1891–1898.

[36] LEI X G,KU P K,MILLER E R,et al.Supplementing corn-soybean meal diets with microbial phytase linearly improves phytate phosphorus utilization by weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1993,71(12):3359–3367.

[37] LEYTEM A B,MAGUIRE R O,TURNER B L,et al.Environmental implications of inositol phosphates in animal manures[M].Inositol phosphates linking agriculture & the environment.Wallingford:CABI Publishing,2007:150–168.

[38] XIN G L,PORRES J M.Phytase enzymology,applications,and biotechnology[J].Biotechnology Letters,2003,25(21):1787–1794.

[39] 张军民, 邓丽青, 陈茹梅, 等.转植酸酶基因玉米对肉仔鸡生长性能及钙磷代谢的影响[J].中国兽医学报,2011,31(2):283–287.

[40] 黎相广, 陈明霞, 吴同山, 等.转植酸酶基因玉米对断奶仔猪生长性能和钙磷表观消化率的影响[J].饲料工业,2014,35(24):30–34.
[41] 唐志如, 印遇龙, 黄瑞林.如何建立动物生态营养体系[J].家畜生态,2002,23(4):56–59.
[42] 刘会江, 张利国, 王盘鑫.提高猪只的饲料利用率[J].中国畜牧兽医文摘,2013(5):68.
[43] 廖明星.不同品种猪饲料利用率与生长性状测定及表型相关分析和候选 miRNA 鉴定[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2013.
[44] 段栋梁, 穆秀梅, 王树华, 等.饲养阶段细划分下生长育肥猪的饲养效果[J].河南农业科学,2017,46(5):147–151.
[45] NAHM K H.Efficient feed nutrient utilization to reduce pollutants in poultry and swine manure[J].Critical Reviews in Environmental Control,2002,32(1):1–16.
[46] 冯飞, 李义书, 张益焘, 等.海口市典型规模化养殖场环境污染现状分析[J].家畜生态学报,2014,35(11):45–52.
[47] 杜会英, 程波, 张爱.控制畜禽粪便磷流失措施探讨[J].农业环境科学学报,2007(S2):476–478.
[48] 贾伟.我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.
[49] 卢健.奶牛场排泄物产生、收集、堆积及处理过程中氮、磷变化研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2013.
[50] 李国林.规模化奶牛场产排污系数、污水存贮及土地消纳量相关技术参数研究[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2014.
[51] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等.厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(1):179–184.
[52] 彭忆兰.三种植物在人工湿地系统处理养殖废水中的应用研究[D].硕士学位论文.北京:中国林业科学研究院,2015.
[53] VAN DIJK K C,LESSCHEN J P,OENEMA O.Phosphorus flows and balances of the European Union Member States[J].Science of the Total Environment,2016,542:1078–1093.
[54] 张福锁, 马文奇, 陈新平.养分资源综合管理理论与技术概论[M].北京:中国农业大学出版社,2006.
[55] OENEMA O,WITZKE H P,KLIMONT Z,et al.Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27[J].Agriculture,Ecosystems &

Environment,2009,133(3/4):280–288.
[56] FORBES E G A,EASSON D L,WOODS V B,et al.An evaluation of manure treatment systems designed to improve nutrient management.A report to the expert group on alternative use of manures[M].Hillsborough:Agri-Food and Bioscience Institute,2006.
[57] MA L,MA W Q,VELTHOF G L,et al.Modeling nutrient flows in the food chain of China[J].Journal of Environmental Quality,2010,39(4):1279–1289.
[58] 魏莎, 马林, 江荣风, 等.基于 NUFER 模型的生猪养殖氮磷利用效率及排放时空变化[J].农业工程学报,2016,32(13):190–196.

Study on High Efficiency Utilization and Emission Reduction of Phosphorus in Feed-Animal-Manure Chain

GUO Yongqing[1,2]　TU Yan[3]　BAI Zhaohai[1]　MA Lin[1*]
(1. *Key Laboratory of Agricultural Water Resources*, *Center for Agricultural Resources Research*, *Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture*, *Institute of Genetics and Developmental Biology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shijiazhuang* 050021, *China*; 2. *College of Animal Science*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*; 3. *Feed Research Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Phosphorus (P) is one of the essential mineral element, and dietary P play an important role in the growth, development, and performance of animals. However, the efficiency of P used in animal system is very low, a large amount of undigested feed P excreted with manure, and easy to enrich in the environment, resulted in serious P pollution. The efficiency of P in animal system is affected by the whole chain of feed production, animal farming, and manure utilization. Therefore, this paper summarized the P flow law in the feed-animal-manure chain of China and the mechanism and technical principle of different P reduction strategy, which include the technology of source control, process control and terminal control. The further directions and significances of P reduction research were discussed.

*Corresponding author, professor, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

（责任编辑　菅景颖）

Keywords: phosphorus; feed; animal; manure; emission reduction

*Corresponding author, professor, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn （责任编辑 菅景颖）